

无变压器非隔离型光伏并网逆变器直流注入控制技术

王宝诚, 郭小强, 梅强, 孙孝峰, 邬伟扬

(电力电子节能与传动控制河北省重点实验室(燕山大学), 河北省 秦皇岛市 066004)

DC Injection Control for Transformerless PV Grid-connected Inverters

WANG Bao-cheng, GUO Xiao-qiang, Mei Qiang, SUN Xiao-feng, WU Wei-yang

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei province (Yanshan University), Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China)

ABSTRACT: DC injection restriction is a critical issue in the photovoltaic power systems. IEEE Std.929-200 specifies that the grid-connected inverter system shall not inject the dc current greater than 0.5% of the full rated output current. However, few literatures discuss this problem. Considering the inherent dc-block characteristic of the capacitor, a DC injection control scheme was proposed based on virtual capacitor with the grid current fed forward to duty ratio from the view point of control theory, which can effectively mitigate the DC component. The operation principle of the proposed solution was analyzed and the current controller and phase locked algorithm were discussed. Matlab simulations and 500 W prototype experiments were carried out, and the results verify the effectiveness of the proposed scheme.

KEY WORDS: grid-connected inverters; DC injection; virtual capacitor; phase lock

摘要: 直流注入是光伏并网发电系统中的一个重要问题。IEEE Std.929-2000 规定直流注入必须小于系统额定电流的0.5%。然而, 目前关于直流注入问题的相关研究较少。借鉴电容隔离直流的特性, 从控制理论角度出发, 提出一种基于虚拟电容的并网逆变器直流注入控制策略, 通过并网电流前馈至占空比实现虚拟电容, 有效地消除了并网电流中可能存在的直流分量。分析此方案的工作原理, 设计电流控制和锁相算法, 并采用Matlab/Simulink进行仿真研究。在500 W实验样机上进行方案可行性分析, 实验结果验证了此方案的有效性。

关键词: 并网逆变器; 直流注入; 虚拟电容; 锁相

0 引言

随着光伏产业的迅猛发展, 基于电力电子变换

器的光伏发电系统得到广泛应用^[1-2]。光伏系统一般采用电压源型逆变器作为并网接口^[3], 通过控制逆变器输出电流与电网电压同频同相实现单位功率因数并网发电^[4]。早期的并网逆变器系统输出端一般安装工频隔离变压器, 实现电压调整和电气隔离, 然而, 工频隔离变压器体积大, 成本高, 损耗大, 影响系统整机效率。因此, 无工频隔离变压器的并网逆变器系统成为目前研究热点^[5]。虽然去掉工频变压器可以使并网逆变器系统整体效率得到一定改善, 但却带来一些新的问题, 如漏电流和直流注入等^[6-7]。漏电流的本质为共模电流, 其产生原因是光伏系统和大地之间存在寄生电容, 当寄生电容-光伏系统-电网三者之间形成回路时, 共模电压将在寄生电容上产生共模电流^[8]。当光伏系统中安装有工频变压器时, 由于回路中变压器绕组间寄生电容阻抗相对较大, 因此回路中的共模电压产生的共模电流可以得到一定抑制^[8]; 然而, 在无变压器的光伏系统中, 回路阻抗相对较小, 共模电压将在光伏系统和大地之间的寄生电容上形成较大的共模电流。实际应用中可以通过改进系统拓扑或调制方法减小或消除共模电流^[8]。

本文主要研究内容为光伏系统直流注入问题。理论上, 并网逆变器只向电网注入交流电流。然而在实际应用中, 并网电流中往往含有直流分量。IEEE Std. 929-2000 中规定光伏系统并网电流中直流分量必须小于系统额定电流的0.5%。西班牙学者 V. Salas 在其 2007 年一份研究报告中指出^[9]: 大量光伏并网系统存在直流注入现象。光伏系统并网直流注入将对电网设备产生不良影响, 如引发变压器或互感器饱和、变电所接地网腐蚀等问题^[10-11]。因此, 研究并网直流注入问题具有重要的现实意义。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50837003); 河北省自然科学基金(E2008000777)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50837003).

然而,目前国内关于光伏系统直流注入方面的研究相对较少。国外方面,文献[12]提出一种直流分量检测及校正方法,理论上可实现较好的直流抑制效果,然而,其直流抑制效果在很大程度上取决于检测元件的精度。由于并网电流中直流成分相对较小,低精度检测元件不仅无法实现准确的直流检测,其检测误差往往引入其他谐波成分,而高精度检测元件或检测电路意味着高成本。此外,文献[12]探讨了2种直流注入抑制方法:1)采用半桥拓扑;2)在并网逆变器输出侧串联隔直电容。半桥拓扑中由于并网电流始终经过直流侧电容,因此直流分量将被电容隔离,但在相同电网电压等级情况下,半桥拓扑所需的直流母线电压是全桥拓扑的两倍,因此开关器件承受电压应力相对较高。隔直电容法虽然能有效抑制直流分量,但为了避免过大的基波压降,交流电容取值一般较大,成本较高。实际应用中,理想的电容是不存在的,电容的杂散参数将影响系统整机效率,而且电容一旦损坏引起断路,将造成电感能量无法泄放而导致过电压现象。本文提出一种基于虚拟电容的直流抑制方法,采用控制方法代替隔直电容,使并网逆变器既可实现零直流注入,又可实现隔直电容零损耗。

1 并网逆变器控制原理分析

1.1 单相光伏并网逆变器原理图

图1为典型的单相光伏并网逆变器原理图。其中,直流母线电压 U_d 由光伏电池经过DC/DC升压提供。DC/AC逆变桥输出经过滤波电感 L 连接到电网 U_g 上,通过适当控制使并网电流 I_o 为与电网电压同频同相的正弦波^[13]。

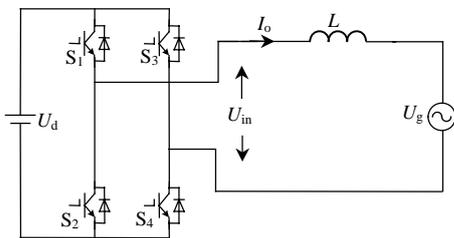


图1 单相并网逆变器原理图

Fig. 1 Diagram of single-phase grid-connected inverters

1.2 虚拟电容原理

实际应用中并网电流可能存在直流分量,其产生原因一般可归为2类:1)包括参考电流或载波中含有的直流成分,均可等效为参考电流含有直流分量;2)包括电网侧含有直流成分或半导体开关特性不对称导致的直流分量等,均可等效为电网侧

含有直流分量。为了抑制并网电流直流分量,可以在逆变器输出端串联交流电容 C ,如图2所示。

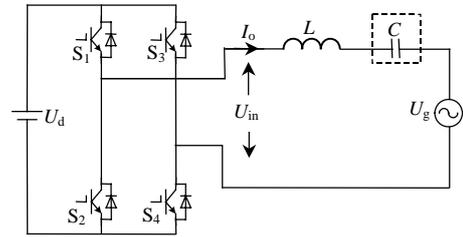


图2 带有隔直电容的并网逆变器

Fig. 2 Grid-connected inverters with dc-block capacitor

图2中并网逆变器输出侧电路时域和频域数学方程如式(1)、(2)所示:

$$U_{in}(t) = L \frac{dI_o(t)}{dt} + RI_o(t) + \frac{1}{C} \int I_o(t) dt + U_g(t) \quad (1)$$

$$I_o(s) = \frac{Cs}{LCs^2 + RCs + 1} [U_{in}(s) - U_g(s)] \quad (2)$$

式中: U_{in} 为逆变器端电压; R 为电感等效串联电阻。

由式(2)可知,输出电流 $I_o(j\omega)$ 在 $\omega = 0$ 直流频率处为0,因此能够有效抑制直流分量。

当开关频率远高于并网电流频率时,图2并网逆变器控制可简化为线性化大信号模型,如图3所示。其中, I_o^* 为电流参考给定; $G(s)$ 为电流控制器; D 为占空比; K 为脉宽调制(pulse width modulation, PWM)增益。

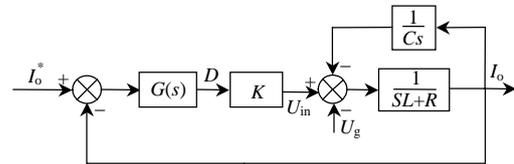


图3 并网逆变器控制模型

Fig. 3 Control model of grid-connected inverters

根据控制理论中“变换前后回路中传递函数乘积保持不变”的原则^[14]对图3进行变换,可得图4。由图4可知,将并网电流前馈至占空比可实现隔直电容的作用,由于其并非客观存在,故称之为虚拟电容。

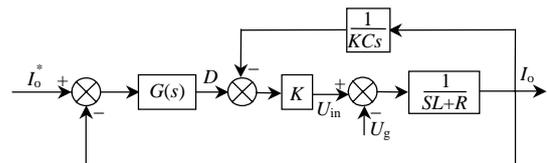


图4 并网逆变器简化模型

Fig. 4 Simplified model of grid-connected inverters

根据图3或图4可得系统传递函数如下:

$$I_o(s) = \frac{KG(s)Cs}{D(s)} I_o^*(s) - \frac{Cs}{D(s)} U_g(s) \quad (3)$$

式中 $D(s) = LCs^2 + RCs + KG(s)Cs + 1$ 。

由上述分析可知，直流分量产生原因可等效为电流参考和电网侧中存在直流成分。下文根据叠加定理分别讨论电流参考和电网电压对并网电流直流分量的影响，相应的传递函数为

$$\frac{I_o(s)}{I_o^*(s)} = \frac{KC_sG(s)}{LCs^2 + RCs + KC_sG(s) + 1} \quad (4)$$

$$\frac{I_o(s)}{U_g(s)} = -\frac{Cs}{LCs^2 + RCs + KC_sG(s) + 1} \quad (5)$$

图 5 为式(4)、(5)的频域分析，其中 M 和 P 分别为幅值和相位，相应系统参数与本文第 2 节中的仿真参数相同。由图 5 可知，2 种情况下，加入电容后在零频率处系统闭环幅频特性均为 0，即直流输入信号经过闭环系统后衰减为 0，实现了零直流注入；而不加入电容将导致系统闭环幅频特性呈非零增益 K ，则直流输入信号经过闭环系统后输出量为输入直流信号的 K 倍，即输出存在直流分量。

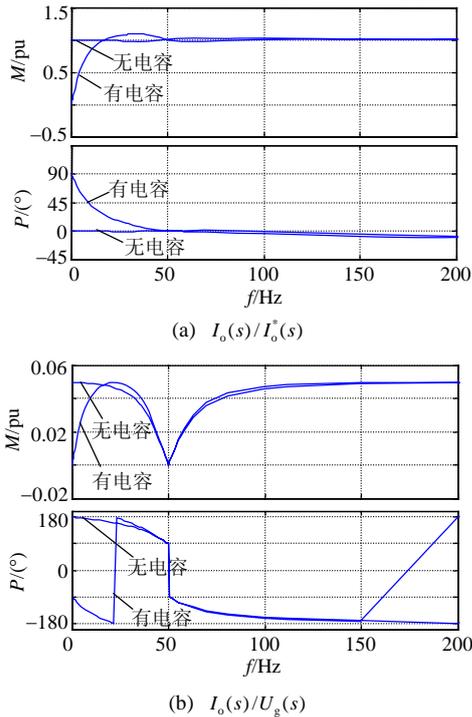


图 5 系统频域分析

Fig. 5 System frequency domain analysis

由上述分析可知，为了避免电容上存在过大的基波压降，要求电容越大越好。然而，过大的电容将影响系统动态性能。为了选择合适的电容值，下面分析电容大小对系统动态性能的影响。图 6 为式(4)、(5)的阶跃响应，与理论分析一致，随着电容值的增大，系统动态响应越慢。因此，综合考虑电容基波压降和动态响应选择电容值为 $1000 \mu\text{F}$ 。

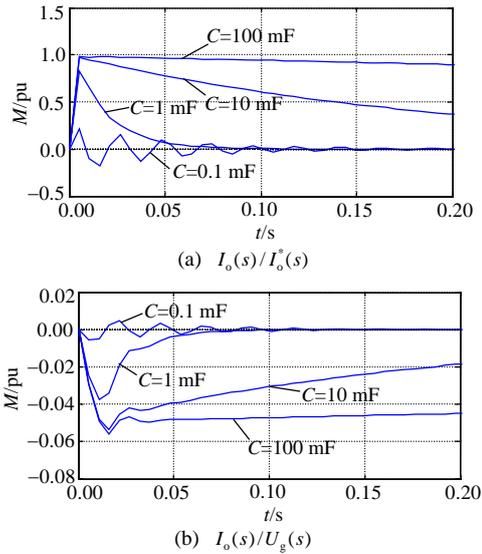


图 6 系统阶跃响应

Fig. 6 System step response

1.3 电流控制设计

传统并网电流调节一般采用PI控制，但是无法消除交流量静差。为了解决该问题，可采用比例谐振PR(P+Resonant)控制，传递函数^[15-16]如下：

$$G(s) = k_p + \frac{k_i s}{s^2 + \omega^2} \quad (6)$$

当电网电压中存在谐波时，由于系统带宽有限，导致电网电压谐波在并网电感上产生谐波电流，从而导致并网电流畸变。为了减小电流畸变，可在PR控制基础上加入谐波补偿器^[17]：

$$G(s) = k_p + \frac{k_i s}{s^2 + \omega^2} + \sum_{n=3,5,7,\dots} \frac{k_{in} s}{s^2 + (n\omega)^2} \quad (7)$$

为了便于 DSP 数字实现，需要将式(7)进行离散化。PR 控制离散化差分方程为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = k_p + \frac{k_i s}{s^2 + \omega^2} \Big|_{s=\frac{2z-1}{Tz+1}} \Rightarrow G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = k_p + \frac{a(1-z^{-2})}{1+bz^{-1}+z^{-2}} \quad (8)$$

式中： $a = \frac{2Tk_i}{\omega^2 T^2 + 4}$ ； $b = \frac{2\omega^2 T^2 - 8}{\omega^2 T^2 + 4}$ 。

$$y(k) = k_p x(k) + a[x(k) - x(k-2)] - by(k-1) - y(k-2) \quad (9)$$

式中 $x(k)$ 和 $y(k)$ 分别为 PR 控制器的输入和输出。

1.4 并网锁相设计

传统并网锁相一般采用电网电压过零点检测方法，虽然简单易实现，但对电网电压畸变或扰动敏感，尤其是电网电压出现缺口时，过零点检测方法失效^[18]。为了解决该问题，本文设计了一种基于

自适应滤波器的锁相方法。自适应滤波数学方程^[19]为

$$\begin{cases} \ddot{x} + \omega^2 x = 2b\omega[y(t) - \dot{x}] \\ \dot{\omega} = -a\omega[y(t) - \dot{x}] \end{cases} \quad (10)$$

当输入信号为 $y(t) = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$ 时, 式(10)有唯一解^[19]:

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \dot{\bar{x}} \\ \bar{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(U_m / \omega_0) \cos(\omega_0 t + \varphi) \\ U_m \sin(\omega_0 t + \varphi) \\ \omega_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

并网逆变器一般工作在单位功率因数发电模式, 若电网电压为 $U_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$, 则并网电流参考应保持与电网电压同频同相 $I_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$, 因此必须得到电网的频率和相位信息 $\sin(\omega_0 t + \varphi)$, 数学方程如下:

$$f = \frac{\dot{\bar{x}}}{\sqrt{(\dot{\bar{x}})^2 + (\bar{x}\omega)^2}} \quad (12)$$

图7为单相并网锁相原理图^[19]。设电网电压为 $U_{in} = 3\sin(\omega t) + 0.5\sin(3\omega t) + 0.2\sin(5\omega t)$ 并加入缺口, 参数 $a=2, b=0.1$, 锁相结果如图8所示。

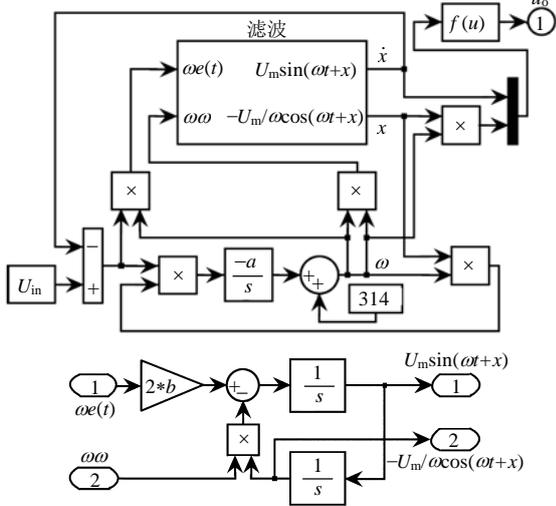


图7 并网锁相原理图

Fig. 7 Diagram of phase lock for grid-connection

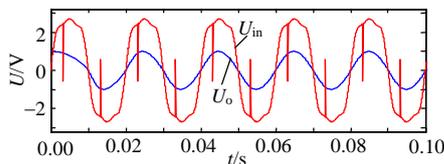


图8 锁相结果

Fig. 8 Phase lock results

由图8可以看出, 电网电压畸变且存在缺口时, 本文设计的锁相方法仍能快速准确地计算出电网电压基波分量, 为并网电流提供频率和相位参考信息 $\sin(\omega t)$ 。

2 仿真研究

本文采用Matlab/Simulink对基于虚拟电容的直流注入控制策略进行仿真研究, 系统参数如下: 电网电压 220 V/50 Hz, 直流母线电压 400 V, 并网电流额定峰值 10 A, 开关频率 20 kHz, 滤波电感 3 mH, 虚拟电容 1000 μ F, PR控制器参数 $k_p=0.05, k_i=10$ 。

下面分别对第1类和第2类直流分量进行分析。

第1类: 设并网参考电流为 $I_o^* = 10\sin(\omega t) + 1$ 。

图9为无虚拟电容时的仿真结果, 由图9可以看出, 并网逆变器输出电流实现零稳态误差, 基波分量为 10 A, 但并网电流中含有直流偏置成分约为 1 A。与图5(a)分析一致, 零频率处非零增益 $K=1$ 导致参考中 1 A 直流成分通过闭环系统后输出为输入直流的 K 倍, 即输出直流分量为 1 A。

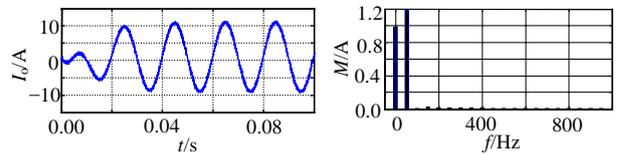


图9 并网电流及其频谱分析(无虚拟电容)

Fig. 9 Grid current and spectrum analysis without virtual capacitor

图10为加入虚拟电容时的仿真结果, 可以看出, 并网逆变器输出电流中不含有直流成分。与图5(a)分析一致, 加入虚拟电容后, 零频率处零增益 $K=0$ 导致 1 A 的直流成分通过闭环系统后输出为输入直流的 K 倍, 即输出直流分量为 0 A。

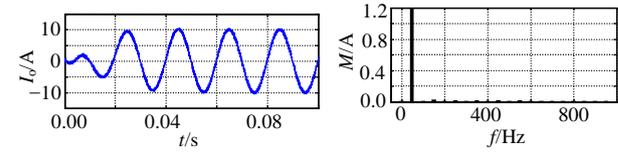


图10 并网电流及其频谱分析(加虚拟电容)

Fig. 10 Grid current and spectrum analysis with virtual capacitor

第2类: 设电网电压为 $U_g = 311\sin(\omega t) + 15$ 。

图11为无虚拟电容时的仿真结果。与图5(b)分析一致, 零频率处非零增益 $K=0.05$, 导致 15 V 的直流成分通过闭环系统后输出为输入直流的 0.05 倍, 即输出直流分量为 0.75 A。图12为加入虚拟电容时

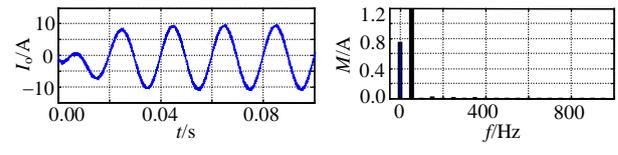


图11 并网电流及其频谱分析(无虚拟电容)

Fig. 11 Grid current and spectrum analysis without virtual capacitor

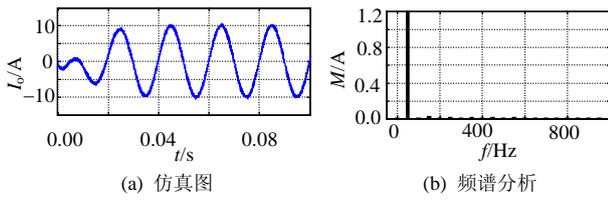


图 12 并网电流及其频谱分析(加虚拟电容)
Fig. 12 Grid current and spectrum analysis with virtual capacitor

的仿真结果。与图 5(b)分析一致，加入电容后，零频率处零增益 $K=0$ ，导致 15 V 的直流成分通过闭环系统后输出为输入直流的 0 倍，即输出直流分量为 0A。

3 实验结果

为了验证上述控制方案的有效性，搭建了以TI 公司DSP TMS320F2812 为主控芯片的单相并网逆变器实验平台，系统主电路采用单相全桥拓扑，直流母线电压 200 V，电网电压 110 V/50 Hz，滤波电感 6 mH，额定并网电流峰值 5 A，开关频率 10 kHz，采用单极性倍频调制，等效开关频率 20 kHz。控制器参数 $k_p=0.2$ ， $k_{i1}=80$ ， $k_{i3}=40$ ，虚拟电容值 500 μ F。采用LV28-P电压霍尔和LA58-P电流霍尔分别检测电网电压和电感电流，并将其转换为 0~3V 以满足 DSP 模数转换的要求，采用DAC7625 数模转换芯片输出 DSP 内部并网电流参考，用于评估并网锁相的精度。图 13 为并网锁相实验波形，由图 13 可以看出，DSP 软件锁相算法准确地锁定了电网电压的频率和相位，为并网电流提供了参考信息。

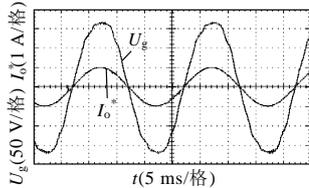


图 13 电网电压和电流参考
Fig. 13 Grid voltage and current reference

图 14 为并网电流波形及其频谱分析。图 14(a) 为并网电流的启动波形，在电网电压正向过零点启动并网逆变器工作，经过一个工频周期进入稳态，和上文理论分析一致，PR 控制可以消除并网电流稳态误差，电流稳态幅值为 5 A，但电流中存在谐波成分，电流总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD) 为 6.42%。其主要原因是电网电压谐波导致，可以采用上文的谐波补偿器对谐波进行抑制。图 14(c) 为加入三次谐波补偿后的实验波形，图 14(d) 为谐波补偿器前后并网电流频谱分析，电流 THD 由 6.42% 减小为 3.59%。理论上加入三次谐波补偿器后并网电流中三次谐波含量可以完全消除，但图

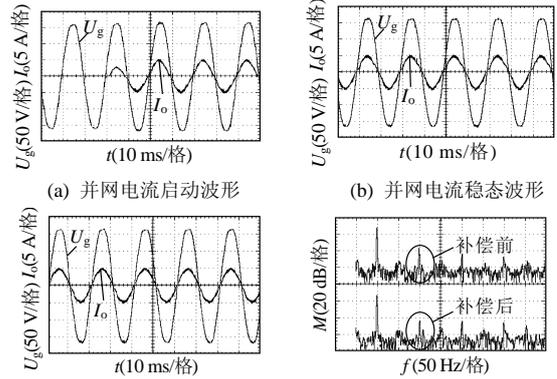


图 14 并网实验结果
Fig. 14 Experimental results of Grid connection

14(d)实验结果中却存在少量三次谐波成分，其主要原因是定点 DSP 量化误差和电网频率微小波动导致三次谐波无法完全补偿^[20]。

针对第 1 类直流分量抑制进行实验。在并网参考电流中加入 1 A 直流分量，即 $5\sin(\omega t)+1$ ，加入虚拟电容前后实验结果如图 15、16 所示。和上文理论分析一致，未加入虚拟电容时，系统闭环直流频率增益为 1，参考中的直流分量将通过系统闭环无衰减地反映在输出电流上，导致图 15(a)和 15(b)中存在 1 A 直流分量。加入虚拟电容后，系统闭环直流频率处增益为 0，因此参考中直流分量通过系统闭环衰减至 0，实现了并网零直流注入，如图 16(a)和 16(b)所示。值得注意的是，加入虚拟电容后，并网电流 THD 由 3.59% 减小为 3.14%，其原因是虚拟电容存在等效阻抗，可以在一定程度上对谐波进行抑制，从而改善了并网电流波形。

由于实验室条件有限，无法实现在网侧串联直流分量模拟第 2 类直流抑制实验，但根据上文理论分析和第 1 类的实验结果可知，虚拟电容对第 2 类直流抑制同样有效。此外，实验中一个有趣的现象是，启动并网电流时网侧电压升高(voltage rise, VR) 如图 14(a)、15(a)和 16(a)所示，该问题也是大规模分布式系统并网发电中一个热点问题^[21-22]，其主要原因是有功电流在电网阻抗或变压器漏感上形成正向压降所致，可通过适当注入无功减小 VR。该问题不是本文研究重点，具体内容可参考文献[23]。

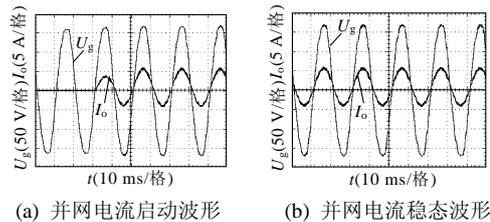


图 15 实验结果(无虚拟电容)
Fig. 15 Experimental results without virtual capacitor

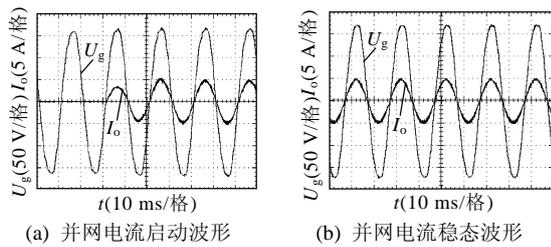


图16 实验结果(加虚拟电容)

Fig. 16 Experimental results with virtual capacitor

4 结论

直流注入抑制是光伏并网发电系统中需要解决的关键问题之一。本文通过并网电流前馈至占空比实现隔直电容功能,从控制理论角度对并网直流注入进行了有效抑制。文中还设计了一套简单实用的并网锁相和电流控制方法,改善了电网电压畸变情况下并网电流的波形质量。仿真和实验结果表明,基于虚拟电容的控制方法可以实现并网逆变器零直流注入,具有原理简单易于实现等特点,具有一定工程应用价值。

参考文献

- [1] Li Quan, Wolfs P. A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different DC link configurations[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2008, 23(3): 1320-1333.
- [2] Carrasc J M, Franquelo L G, Bialasiewicz J T, et al. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1002-1016.
- [3] Kjaer S B, Pedersen J K, Blaabjerg F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2005, 41(5): 1292-1306.
- [4] 顾和荣, 杨子龙, 邬伟扬. 并网逆变器输出电流滞环跟踪控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 108-112.
Gu Herong, Yang Zilong, Wu Weiyang. Research on hysteresis-band current tracking control of grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 108-112(in Chinese).
- [5] González R, López J, Sanchis P, et al. Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2007, 22(2): 693-697.
- [6] López Ó, Teodorescu R, Freijedo F. Leakage current evaluation of a single-phase transformerless PV inverter connected to the grid [J]. IEEE Applied Power Electronics Conference, Anaheim, United States, 2007.
- [7] Salas V, Ollas E, Alonso M, et al. Overview of the legislation of DC injection in the network for low voltage small grid-connected PV systems in Spain and other countries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(2): 575-583.
- [8] Gubía E, Sanchis P, Ursúa A, et al. Ground currents in single-phase transformerless photovoltaic systems[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2007, 15(7): 629-650.
- [9] Salas V, Alonso-Abella M, Ollas E, et al. DC current injection into the network from PV inverters of less than or equal 5kW for low-voltage small grid-connected PV systems[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2007, 91(9): 801-806.
- [10] Ahfock A, Hewitt A. DC magnetisation of transformers[J]. IEE Proceedings of Electric Power Applications, 2006, 153(4): 601-607.
- [11] 李晓萍, 文习山, 蓝磊, 等. 单相变压器直流偏磁试验与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 33-40.
Li Xiaoping, Wen Xishan, Lan Lei, et al. Test and simulation for single-phase transformer under dc bias[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 33-40(in Chinese).
- [12] Armstrong M, Atkinson D J, Johnson C M, et al. Auto-calibrating DC link current sensing technique for transformerless, grid connected, h-bridge inverter systems[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2006, 21(5): 1385-1393.
- [13] 吴春华, 陈国呈, 丁海洋, 等. 一种新型光伏并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(33): 103-107.
Wu Chunhua, Chen Guocheng, Ding Haiyang, et al. A novel control strategy for photovoltaic grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(33): 103-107(in Chinese).
- [14] 夏德铃. 自动控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 29.
- [15] Twining E, Holmes D G. Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2003, 18(3): 888-895.
- [16] 涂春鸣, 罗安, 汤赐, 等. 注入式混合型有源电力滤波器的控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 52-58.
Tu Chunming, Luo An, Tang Ci, et al. Control of injection type hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 52-58 (in Chinese).
- [17] Teodorescu R, Blaabjerg F, Borup U, et al. A new control structure for grid-connected LCL PV inverters with zero steady-state error and selective harmonic compensation[C]. IEEE Applied Power Electronics Conference, Anaheim, United states, 2004.
- [18] 孔雪娟, 罗昉, 彭力, 等. 基于周期控制的逆变器全数字锁相环的实现和参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 60-64.
K Xuejuan, Luo Fang, Peng Li, et al. Implement and parameter design of DPLL for invertors based on cycle control[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 60-64 (in Chinese).
- [19] Mojiri M, Karimi-Ghartemani M, Bakhshai A. Time-domain signal analysis using adaptive notch filter [J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2007, 55(1): 85-93.
- [20] Teodorescu R, Blaabjerg F, Liserre M, et al. Proportional resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters [J]. IEE Proc. Electric Power Applications, 2006, 153(5): 750-762.
- [21] Masters C L. Voltage rise: the big issue when connecting embedded generation to long 11 kV overhead lines[J]. Power Engineering Journal, 2002, 16(1): 5-12.
- [22] Woyte A, Thong V V, Belmans R, et al. Voltage fluctuations on distribution level introduced by photovoltaic systems[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2006, 21(1): 202-209.
- [23] Carvalho P M S, Correia P F, Ferreira L A F M. Distributed reactive power generation control for voltage rise mitigation in distribution networks[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2008, 23(2): 766-772.



王宝诚

收稿日期: 2009-11-06.

作者简介:

王宝诚(1962—),男,教授,研究方向为光伏并网发电系统、脉冲功率电源技术、电力电子电路故障诊断等, bcwang@ysu.edu.cn;

郭小强(1979—),男,博士研究生,研究方向为分布式发电系统并网控制及谐波抑制, yeduming@163.com.

(编辑 吕鲜艳)